

## ディーゼル機関における熱発生率の改善

水 島 一 祐\*・小 林 敬 史\*\*

### Improvement on Heat Release Rate of Diesel Engine

Kazuhiro Mizushima and Keiji Kobayashi

A fuel injection rate and heat release rate of a small bore Diesel engine for experimental use are measured and analyzed with a concept of an approximate combustion delay by which the fuel injection rate is related with the heat release rate. Through the analysis a new pattern of fuel injection rate was tried to create for realizing an optimal heat release rate. And for creating the new pattern, a common rail type fuel injection system controlled electronically was applied to the engine.

Operating tests were performed with the new fuel injection system. As the results, various characteristics of the fuel injection and engine performance were clarified.

#### 1. 緒 言

ディーゼル機関の性能・熱効率の向上については、古くから数多くの研究が行われており、シリンダ内燃焼の経過が機関の性能・熱効率を大きく支配することはよく知られている。シリンダ内に噴射された燃料の燃焼経過すなはち熱発生率（燃焼率）は、燃料の噴射率と密接に関係するが、燃焼現象の複雑さから、熱発生率を燃料噴射システムの構造・性能と関係づけて解析することは容易ではない。

そこで本研究では、小型ディーゼル機関における燃料噴射率および熱発生率を実験的に求め、これら相互の関係を後述する近似燃焼遅れの概念を導入して解析し、適正熱発生率を得るための燃料噴射率の設定を試みる。そして、この燃料噴射率を達成するために、電子制御燃料噴射システムを導入して試験し、これによる燃料噴射特性ならびに機関の性能特性を明らかにする。

#### 2. 小型ディーゼル機関の燃料噴射率および熱発生率

供試小型ディーゼル機関の主な仕様を 表 1 に示す。供試機関を用い、各種負荷条件における燃料噴射圧力ならびにシリンダ内燃焼圧力を測定して、燃料噴射率および熱発生率を求めた。そして、この燃料噴射率と熱発生率の関係を解析するために、噴射された燃料が逐次燃焼するもの

---

\* 機械工学科 \*\* (株)日産ディーゼル技術研究所

表1 供試機関の主仕様

エンジン名称	小松 2D92 型
総排気量	1,302cc
ボア	92mm
ストローク	98mm
圧縮比	18.3
定格回転速度	2,200rpm
定格出力	17Ps(12.5kW)

とする近似燃焼遅れの概念<sup>(1)</sup>に基づいて、近似燃焼遅れ曲線を求めた。なお、この噴射率と近似燃焼遅れの概念を図1に示す。

実測した燃料噴射圧力、シリンダ内燃焼圧力およびこれらから計算によって求められる燃料噴射率、熱発生率の例を図2、図3に示す。また、これらから計算される近似燃焼遅れ曲線の例を図4に示す。図4の近似燃焼遅れ曲線をみると、機関負荷を変更してもこの曲線の形はほとんど変わらず、機関回転数を変更しても同様であった。そこで、この近似燃焼遅れ曲線を機関の負荷および回転数に関わらず一定と見なして以下の検討を行うことにする。

すなわち、種々の運転条件において燃焼遅れを求めて図にプロットすると、図5に示すような分布が得られ、これらを最小二乗法によって近似すると、図中の曲線が得られる。なお、座標軸は、クランク角度で表した燃料の噴射期間および燃焼期間によって、無次元化した値で表示している。この近似燃焼遅れ曲線を用いると、適正な熱発生率を得るための燃料噴射率を予測することができる。

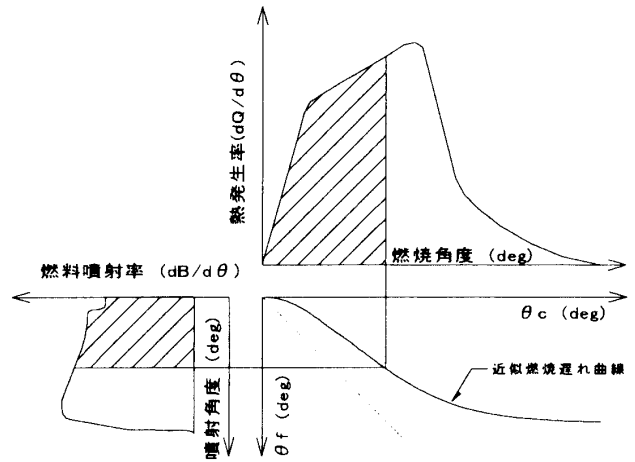


図1 近似燃焼遅れの概念

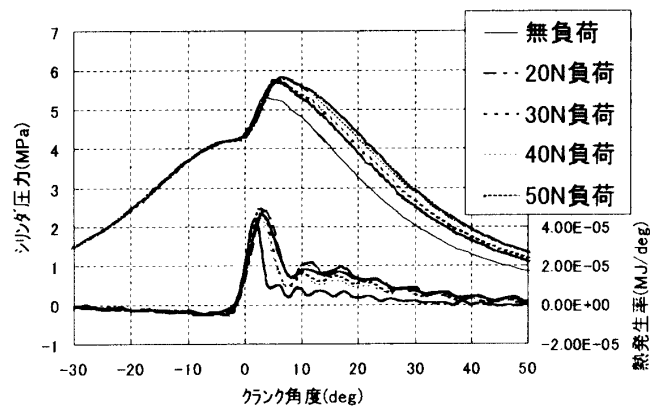


図2 シリンダ内圧力と熱発生率  
(機関回転数 1500rpm)

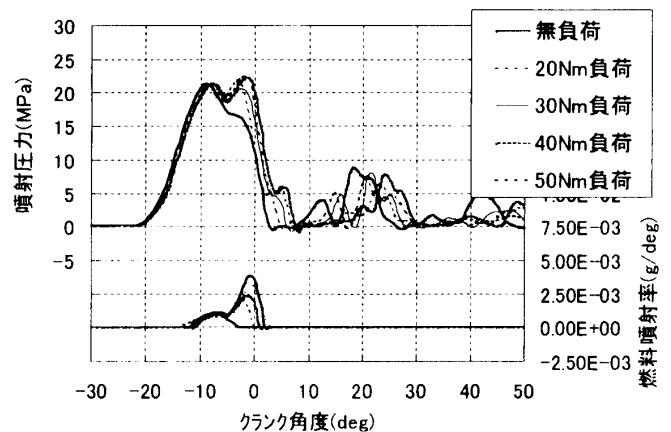


図3 燃料噴射圧力と噴射率  
(機関回転数 1500rpm)

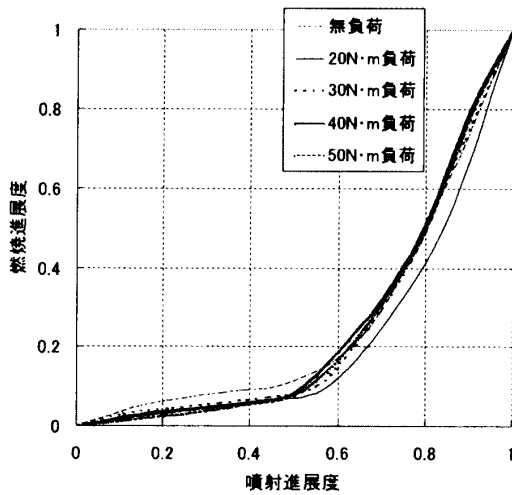


図4 近似燃焼遅れ曲線  
(機関回転数 1500rpm)

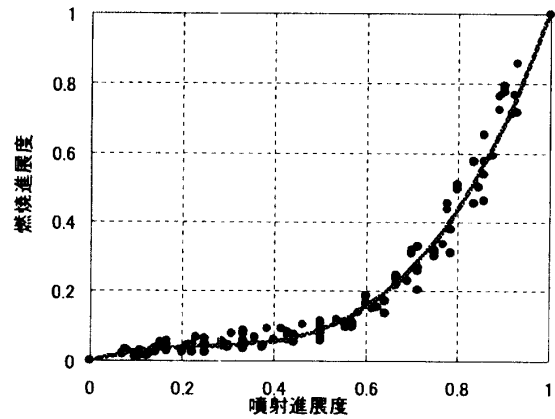


図5 近似燃焼遅れ曲線

### 3. 燃料噴射率の予測

一般に小型ディーゼル機関の燃焼は、燃焼初期の爆発的燃焼（予混合燃焼）とこれに続く拡散燃焼とから成っている。そこで、小型ディーゼル機関の熱発生率のパターンを、二つの三角形で表すことを試み、シミュレーション解析を行った結果、二つの三角形を組み合わせて得られる種々のパターンの熱発生率によって、機関性能をよく評価できることがわかった。その中から、最も高い熱効率が得られる熱発生率の適正パターンを設定し、前述の近似燃焼遅れ曲線を用いて、燃料噴射率の予測を試みた。

図6 は、設定した熱発生率のパターンであり、これを基に近似燃焼遅れ曲線を介して燃料噴射率を予測した結果が、図7 である。図7 から、燃料噴射開始前半の燃料噴射を抑制し、後半に大半の燃料を噴射するべきであることがわかる。このような燃料噴射特性を実現できれば、適正な熱発生率を達成できることになる。

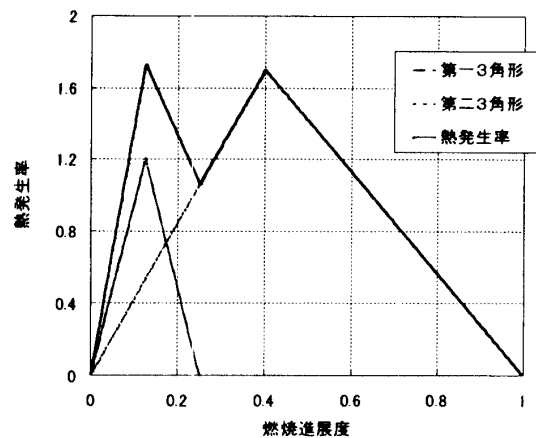


図6 熱発生率パターン

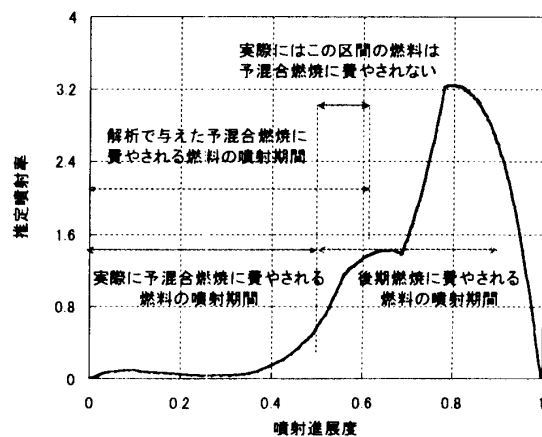


図7 燃料噴射率の予測パターン

## 4. 燃料噴射系の改善

### 4. 1 燃料噴射システムの概要

前節で予測した燃料噴射率を得るためには、噴射率制御が必要である。そこで、任意の噴射率を得るための第一段階として、電子制御燃料噴射系の導入を試みた。すなわちここでは、従来の機械式噴射系に変えて、コモンレール（蓄圧室）を用いて燃料噴射弁の開閉を電子制御する方法により、燃料噴射時期と燃料噴射率の制御を任意に行えるようにした<sup>(2)~(4)</sup>。使用したコモンレール式噴射システムの概略を図8に示す。

このシステムは、燃料を高圧に加圧するためのサプライポンプ（高圧ポンプ）、高圧燃料を蓄えるコモンレール（蓄圧室）、シリンダ内に燃料を噴射するインジェクタおよびシステムを制御するコントロールユニット(ECU)などから構成されている。燃料タンクから供給される燃料は、サプライポンプで加圧されてコモンレールに送られる。コモンレールの圧力は、サプライポンプの吐出量を制御するとともに、リリーフバルブを設けて一定に保持される。そして、高圧燃料油は高圧配管を経てインジェクタに導かれ、ECUからの信号によってインジェクタの噴射制御が行われる。なお、サプライポンプには、供試機関付きのボッシュ型ポンプをそのまま流用した。インジェクタには、DENSO 製小型バス用エンジンの市販品をそのまま使用した。

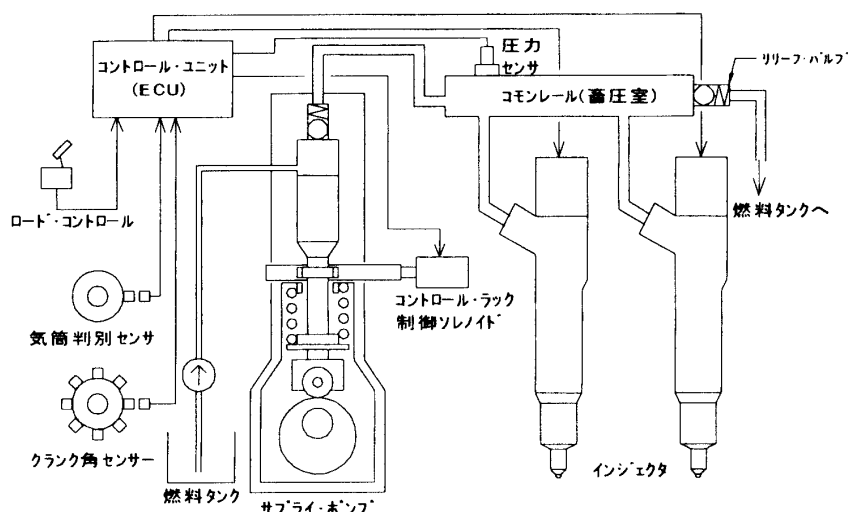


図8 コモンレール式燃料噴射システム

### 4. 2 コントロールシステム (ECU)

燃料噴射開始の信号を基に、インジェクタを駆動、制御するシステムで、噴射時期制御ユニット、噴射信号生成ユニット、インジェクタドライブユニットおよび電源から構成され、噴射開始信号を受けてから一定時間インジェクタを駆動するシステムである。なお、燃料噴射開始信号として、カム軸端に設けたクランク角度検出センサの信号を用いた。全体のシステムの構成を図9に示す。噴射時期制御ユニットは、噴射開始信号を任意の時間だけ遅延させる装置で、これによって機関運転中にも噴射時期を任意に変更することができる。次に噴射信号生成ユニットは、噴射時期制御ユニットからの信号を受けてインジェクタ駆動信号を生成する装置で、任意の間隔で任意の長さのパルス信号を生成することができる。これによって噴射期間を任意に設定し、また2段噴射も実現することができる。

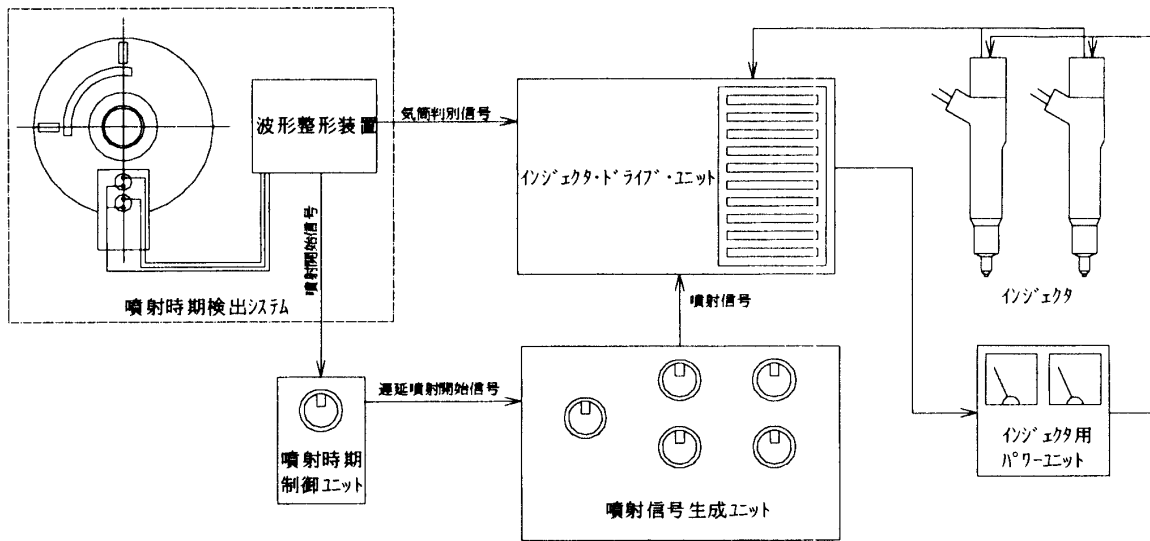


図9 コントロールシステムの構成

インジェクタドライブユニットは、噴射信号生成ユニットからの信号を基に、別途設置したシリンダ判別センサの信号を受けてインジェクタに通電し、当該シリンダのインジェクタを駆動する装置である。

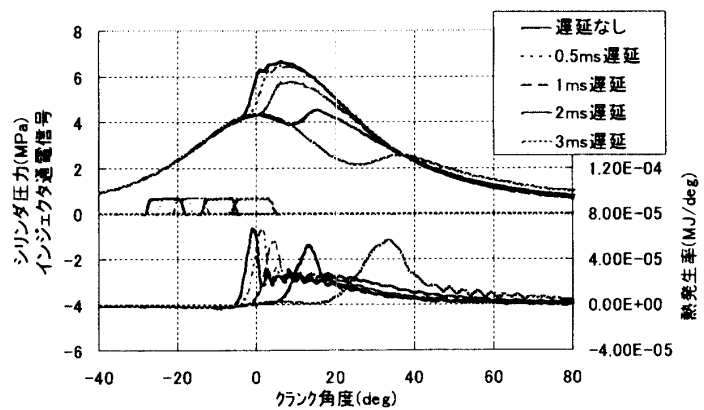


図10 インジェクタ通電時期変更試験の結果

## 5. 燃料噴射特性把握試験

### 5.1 インジェクタ作動試験

前述のコモンレール式燃料噴射システムを実機に搭載して、試験を行った。機関負荷トルク  $40\text{N}\cdot\text{m}$ 、機関回転数  $1250\text{rpm}$  のもとで、コモンレール圧力を  $22\text{MPa}$  として、インジェクタへの通電時期を変更して得られた結果を図10に示す。通電時期を遅らせることにより、シリンダ内燃焼の開始時期が逐次遅れ、通電によって噴射時期が予想通り変化していく様子をよく観察することができる。また、インジェクタへの

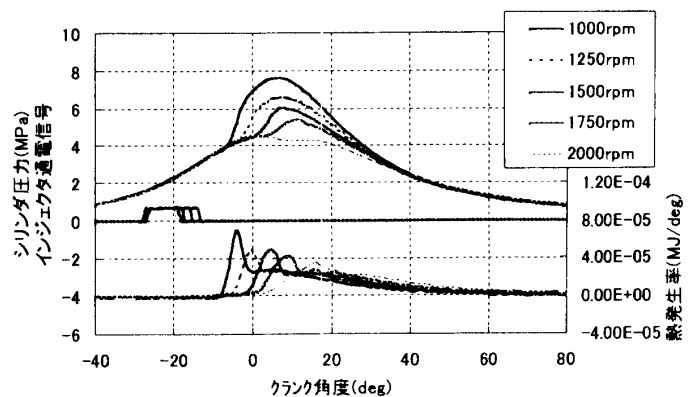


図11 インジェクタ通電時期一定試験の結果

通電時期を一定に保持し、機関トルク一定のもとで機関回転数を変更して得られた結果を図11に示す。図から、機関回転数が上昇するにしたがって燃焼開始時期が遅れているが、噴射開始信

号の立ち上がりから燃焼開始までの時間はほぼ 3 ms で一定である。噴射開始信号の立ち上がりと同時に燃料の噴射が開始されるものとする、この時間は燃料の着火遅れに相当するが、着火遅れ時間にしては常識的に長すぎる。すなわち、使用したインジェクタには、通電してから実際に噴射を開始するまでに機械的な作動遅れがあると考えられる。この作動遅れ時間の値は明確ではないが、燃料の着火遅れは一般的に 1 ms 程度と考えられるので、本インジェクタの場合、約 2 ms の作動遅れを持っていると予想される。

## 5. 2 機関運転特性試験

インジェクタ通電時期およびコモンレール圧力を変更し、機関トルクおよび機関回転数を系統的に変更して試験運転を実施した。結果の一例を図 12 および図 13 に示す。

図 12 は、コモンレール圧力、機関トルクおよび機関回転数一定のもとで、噴射開始信号を基準値から進角させて得た結果である。進角させるとともに、燃焼開始時期が早まり燃焼最高圧力が上昇し、通常の噴射時期変更と同等の結果といえる。

図 13 は、噴射開始時期を一定として、機関トルクおよび機関回転数一定のもとで、コモンレール圧力を 17 ～ 27 MPa まで変更して得た結果である。

図から、コモンレール圧力を上昇するとともに、燃焼開始時期が早くなり、燃焼

最高圧力も上昇しているが、これは、コモンレール圧力が上昇したことによってインジェクタの作動遅れ時間が短縮されると同時に、噴霧の霧化が良好になったためと考えられる。以上より、今回製作した燃料噴射制御システムによって、燃料噴射条件を任意に設定できることがわかった。

## 6. 運点特性曲線の作成

以上の実験結果を基に、インジェクタを駆動するためのインジェクタ通電時期と、燃焼開始時期ならびに燃焼最高圧力の関係を整理した。その結果を図 14 に示す。図は、コモンレール圧力 17 MPa にて、インジェクタ通電時期を変更して得られた結果で、いずれの機関回転数においても、燃焼開始時期はインジェクタ通電時期に対して直線的に変化していることがわかる。

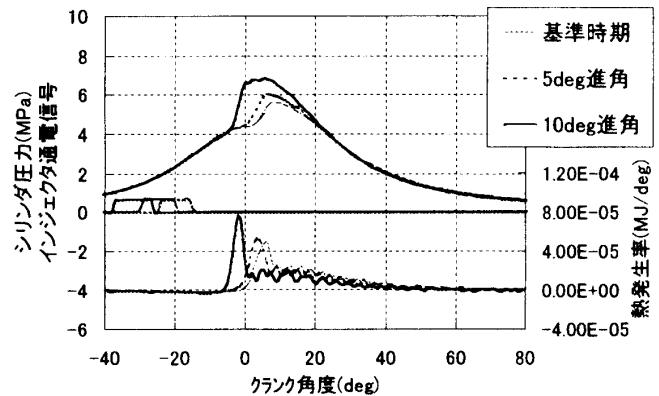


図 12 噴射開始時期変更試験

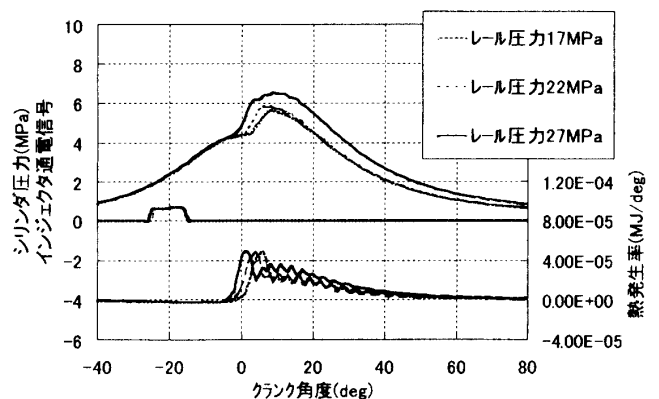


図 13 コモンレール圧力変更試験

また、機関回転数の上昇とともに、燃焼開始時期が遅れていくが、これは機関回転数の上昇とともにクランク角度で表した噴射遅れ期間（燃焼開始遅れ）が大きくなるためである。なお、この図では、機関トルクを変更した時の実験点も同時にプロットしているが、多少のばらつきは認められるもののほとんど変わらず、機関トルクの変更が燃焼開始時期に与える影響は僅少であることがわかる。また、図には先に設定した基準通電時期とそれより 5 deg および 10 deg 進角させた場合の曲線を併記しているが、これよりインジェクタ通電時期を進角させた場合の燃焼開始時期を予測することができる。

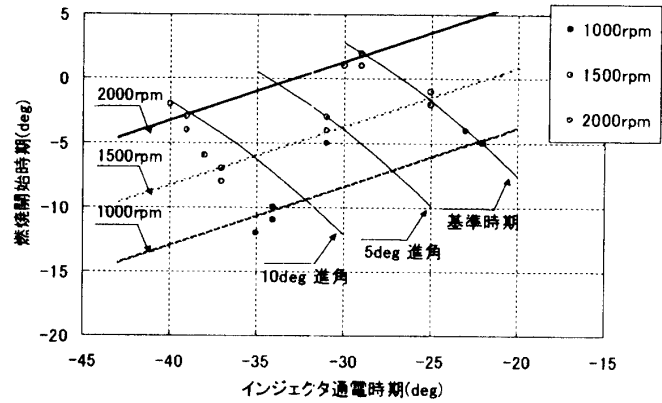


図 14 インジェクタ通電時期と燃焼開始時期

同様に、インジェクタ通電時期に対する燃焼最高圧力の関係をまとめると、図 15～17 のようになる。これらの図からわかるように、インジェクタ通電時期に対して燃焼最高圧力も直線的に変化している。そして、機関回転数の上昇とともに燃焼最高圧力は低下する。ここでも、先の図 14 と同様に機関トルクの異なるデータをまとめてプロットしているが、そのばらつきの範囲は小さく、実験に用いたコモンレールシステムでは機関トルクの変化が燃焼最高圧力に及ぼす影響が小さいことがわかる。また図には機関改良前（機械式噴射系）における、燃焼最高圧力の運転範囲を表示しているが、燃焼最高圧力がこの範囲内に入るようにインジェクタ通電時期を制御すれば、機械式噴射系機関と同等の運転ができることがわかる。

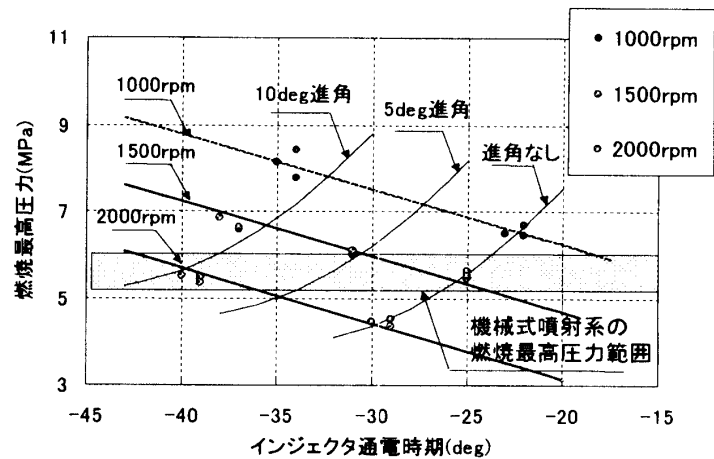


図 15 インジェクタ通電時期と燃焼最高圧力  
(コモンレール圧力 17 MPa)

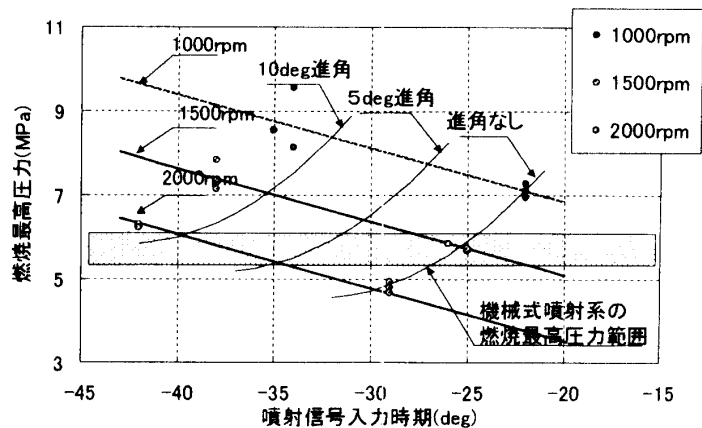


図 16 インジェクタ通電時期と燃焼最高圧力  
(コモンレール圧力 22 MPa)

これらの線図を用いることにより、機械式噴射系機関と同等の運転はもとより、これまでにできなかった条件での運転が可能になるが、燃焼最高圧力が機関の熱的、機械的強度によって制約されるから、これを超えない範囲で条件を設定すべきであることは言うまでもない。

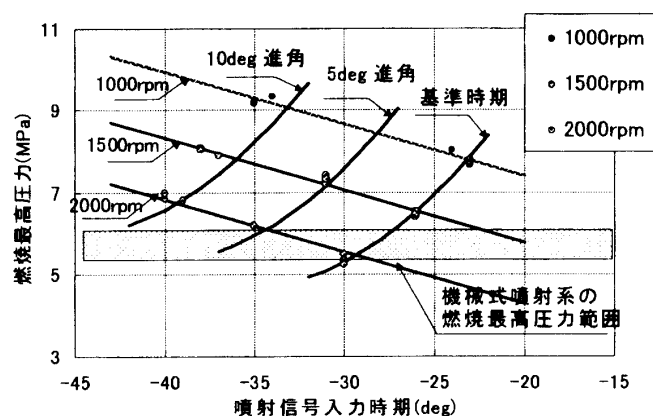


図 17 インジェクタ通電時期と燃焼最高圧力  
(コモンレール圧力 27 MPa)

## 7. 結 言

小型ディーゼル機関における熱発生率を改善することを目的として、燃料噴射率の改善に取り組んできたが、その結果は次のように集約される。

- (1) 実験機関の燃料噴射率および熱発生率を計測し、実働機関の燃料噴射および燃焼の状況をよく把握することができた。
- (2) 得られた燃料噴射率と熱発生率との関係を、近似燃焼遅れ曲線の概念を導入して解析し、与えられた熱発生率のモデルパターンに対して、これを実現するための燃料噴射率パターンを予測することができた。
- (3) 任意の燃料噴射率を得るための第一段階として、コモンレール式電子制御燃料噴射システムを導入して試験し、システムの特性を把握するとともに、噴射時期、噴射期間を自由に設定することができ、さらに2段噴射も実現可能であることが確認された。
- (4) コモンレール式燃料噴射システムを用いて機関の運転試験を行い、今後種々の運転試験を行うための運転特性曲線を作成することができた。
- (5) さらに燃焼を改善するためのコモンレールの高圧力化、安定運転が可能な電子制御ガバナの導入などが今後の課題である。

## 参考文献

- (1) 永井 将, 水島一祐, 浅田忠敬, 大型ディーゼル機関における有効燃焼率の解析, 日本舶用機関学会誌, 5-1, (1970), 41.
- (2) 竹内 誠, HEUI 型コモンレール, エンジンテクノロジー, 2-2, (2000), 34.
- (3) 石渡 宏, 岡本研二, ディーゼルエンジンの燃料噴射系(1), エンジンテクノロジー, 2-1, (2000), 84.
- (4) 岡本研二, 松井宏次, ディーゼルエンジンの燃料噴射系(2), エンジンテクノロジー, 2-2, (2000), 76.

(平成13年12月6日受理)